

6.6kV 200A 초전도 한류기용 초전도소자 설계

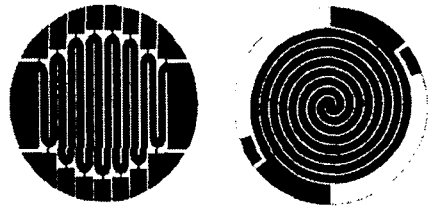
김종성, 이방욱, 박권배, 오일성
LG산전 전력연구소

Design of Superconducting Elements for the 6.6kV 200A Superconducting Fault Current Limiter

J.S. Kang, B.W. LEE, K.B. Park, I.S. Oh
ELECTROTECHNOLOGY R&D CENTER, LG Industrial Systems

Abstract - In these days, there is a demand to develop fault current limiters(FCLs) to reduce excessive fault current and protect electrical equipments which are installed in the transmission and distribution power systems. We considered the resistive superconducting FCLs among the various kinds of FCLs. In this study, in order to develop the resistive superconducting FCL of 6.6kV 200A 3 ϕ , we designed the new mask pattern for etching YBCO films by means of numerical analysis method, current limiting experiments and visualization of bubbles in films and investigated dielectric performance of the designed mask by using electrostatic numerical analysis method and breakdown experiments. We etched YBCO films by using the newly designed mask, connected the etched films in series and in parallel, and designed the 6.6kV resistive SFCL and then we observed the current limiting characteristics of the SFCL.

spiral 형태, bi-spiral 형태 등으로 제작되어 왔다. 본 연구에서는 단위초전도소자의 전압용량 증대를 위해 최적 패턴을 수치해석적 및 실험적 방법으로 결정하고자 하였다.



(a) meander 패턴 (b) bi-spiral 패턴

그림 1 다양한 마스크용 패턴

2. 본 론

1. 서 론

요즘 국내의 전력계통은 지속적으로 증가하는 전력부하로 인해 계통의 예상 고장전류는 점점 더 증가하는 추세이며, 또한 국내 계통의 경우, 상대적으로 국토가 협소하여 계통 선로의 길이가 상대적으로 짧으며, 유지보수의 유연성을 위해 계통을 연계하여 사용하고 있어, 그 고장전류는 더욱 증가하는 추세에 있다. 따라서 국내 송전선로에 기설치된 일부 차단기의 경우, 그 차단용량이 선로의 예상 고장전류보다 작아서 해당 차단기를 새로운 차단기로 교체하거나 선로를 분리해야 하는 상황이다. 본 연구에서는 초전도한류기를 제안하여 선로의 고장전류를 기설치된 차단기의 차단용량 이하로 제한하는 새로운 전력기기를 제안하였다.

현재 한류기의 종류는 광범위하며, 몇 종의 경우 상용화가 진행되고 있는 경우도 있는데, 본 연구에서는 초전도소자를 이용한 저항형 초전도한류기를 제안하였다. 이 저항형 초전도한류기의 경우 초전도소자가 일정조건에서 저항이 영인 초전도상태에서 켄치되어 갑자기 저항이 상승하는 현상을 이용한다. 즉 선로와 직렬로 연결된 초전도한류기는 정상시는 저항이 거의 영이므로 에너지손실이 없으며, 선로에 사고가 발생하고 고장전류가 초전도한류기의 임계전류값을 넘어서면 재빨리 초전도상태에서 상전도상태로 전이하는 켄치현상이 발생하고 선로에 저항성분이 발생하게 되어, 고장전류는 제한되는 원리이다.

본 연구에서는 초전도한류기용 초전도소자로 YBCO 박막을 사용하였으며, 저항형 초전도한류기에 사용되는 YBCO 박막소자는 일반적으로 전압용량 증대 및 필요상전도 저항을 얻기 위해 특별한 패턴으로 제작되어 이용되고 있는데, 패턴의 형상에 따라, meander 형태 혹은

2.1 meander 패턴

앞서 말한 바와 같이 단위초전도소자는 한류특성을 증가시키기 위하여 여러 가지 패턴으로 식각되어 사용되는데 그림 1은 기존에 사용되어 온 meander 및 bi-spiral 식각 마스크를 보여준다. 그런데 meander 패턴을 이용하여 정자계해석을 수행한 결과 stripe의 안쪽 곡면부분에서 전류밀도가 밀한 것을 알 수 있었다. 즉 곡면부분의 내측부근의 전류밀도가 외측부근의 전류밀도에 비해 5배 이상 높은 것을 알 수 있었다. 이는 단위소자박막의 동시켄치를 유도하는 순기능이 있는 반면에 해당 영역에 과도한 열스트레스를 주는 역기능으로 작용한다. 고속카메라를 이용하여 단위소자의 켄치시작, 및 켄치전파, 기포전이를 살펴보았는데, 아래 그림 2에서 알 수 있듯이 항상 단위소자의 켄치시작은 전류밀도가 높은 내측곡면에서 시작하였으며, stripe의 내측곡면에서 시작된 켄치는 외측곡면으로 켄치가 진행되기 전에 직선부분의 stripe으로 켄치가 전파되는 것을 알 수 있었다.

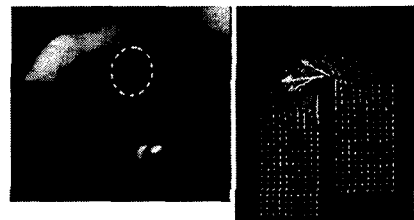


그림 2 stripe 곡면영역의 특성

단일소자내의 이러한 국부적인 켤치현상은 해당영역에 과도한 열스트레스를 주는데, 기존에 켤치실험 도중에 파손된 박막을 살펴보면, 단일소자내에서 전류밀도가 상대적으로 높고 켤치가 시작하는 영역인, 내측곡면 영역에서 파손이 시작되는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 단위소자의 용량을 증가시키기 위해 박막 전 영역에 전류밀도가 상대적으로 균일하게 분포하는 최적 패턴을 구하고자 하였다.

2.2 새로운 패턴의 제안

기존의 meander 패턴으로 식각된 초전도 YBCO 박막의 경우, 내측곡면의 전류밀도가 상대적으로 높아서 해당영역에서 켤치가 시작되며, 또한 순간적으로 과도한 열스트레스를 주는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 이러한 meander 패턴의 단점을 보완하고자 여러 가지 개선안을 제시하였는데, 그 중에서 전류밀도 분포가 밀한 meander 내측곡면의 전류밀도를 상대적으로 균일하게 분포시키고자 그림 3와 같이 내측곡면에 버블코너(bubble corner)를 가지는 meander 패턴을 제안하였다. 버블코너의 최적치름을 결정하기 위해 버블코너의 지름을 0.5mm ~ 2mm 로 변경하여 각각의 경우에서 정자계 해석을 통해 전류밀도 분포를 살펴보았다. 그림 3는 지름을 변경한 버블코너를 고려한 meander 패턴에서 정자계 해석을 수행하여 버블코너의 수직방향으로 전류밀도 분포를 살펴본 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 지름 2mm 의 버블코너를 삽입한 패턴이 약 30% 정도 전류밀도집중이 완화되는 것을 알 수 있다.

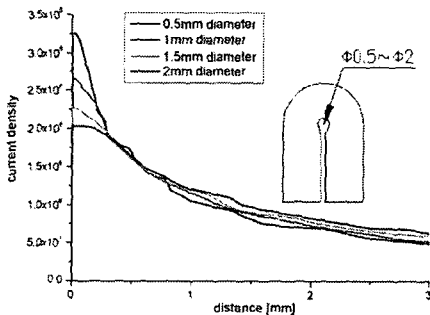


그림 3 B.C.를 고려한 meander 패턴 전류밀도

기존의 meander 패턴에 버블코너를 고려한 패턴이외에 본 연구에서는 중앙부분에 버블코너를 고려한 bi-spiral 패턴도 고려하였다. bi-spiral 패턴의 경우, meander 패턴과 비교하여, 전체 stripe의 길이도 길뿐만 아니라, meander 패턴에 비해 상대적으로 균일한 전류밀도 분포를 이루고 있어 국부적인 열스트레스 측면에 장점이 있다. 그래서 본 연구에서는 최적의 패턴을 결정코자 버블코너를 가지는 meander 패턴 및 bi-spiral 패턴으로 식각된 YBCO 박막을 이용하여 극한성능 실험을 수행하였다. 실험방법은 각 패턴으로 식각된 박막을 액체질소에 넣고 박막의 인가전압을 점점 높여 가면서 켤치실험을 수행하였으며, 또한 각 박막의 켤치전파 특성을 고속카메라를 이용하여 촬영하였다. 실험결과 각 박막의 정격전압에서는 두 패턴 모두 양호한 켤치전파 특성 및 동시켤치특성을 보여주었으나, 단위소자의 정격전압을 초과하여 meander 패턴으로 식각된 박막은 이내 파손되는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 bi-spiral 패턴으로 식각된 박막의 경우 정격전압의 두 배를 인가하여도 박막이 파손되지 않는 것을 알 수 있었으며, 또한 고속카메라를 이용하여 살펴본 켤치전파 특성도 정격전압에서의 특성과 동일하게 양호함을 알 수 있었다. 따라서 6.6kV 200A 초전도한류기용 박막 패턴은 중앙에 버블코너를 가지는 bi-spiral 패턴으로 결정하였다. 그런데

bi-spiral 패턴의 경우, 중앙영역이 열적으로 취약하다고 알려져 있는데, 본 연구에서는 중앙영역의 패턴결정을 위해 여러 가지 형상으로 중앙영역을 모델링하여 정자계 해석을 통해 가장 전류밀도가 균일하게 분포하는 형상을 결정하였고, 그림 4는 본 연구에서 결정된 bi-spiral 패턴의 중앙영역을 보여준다.

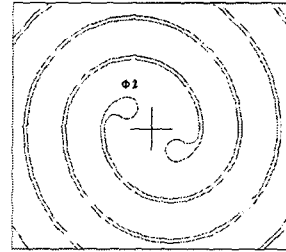


그림 4 제안된 bi-spiral 패턴의 중앙부

2.3 bi-spiral 패턴의 절연성능 검증

bi-spiral 패턴의 경우, 앞서 말한 중앙영역의 열적 취약함외에 다른 취약한 부분이 있는데, bi-spiral 패턴의 경우 전류리드 부근의 stripe 사이에 각 단위소자의 인가전압에 해당하는 전위차가 발생하여, meander 패턴과 비교해 볼 때 절연상 취약한 형상이다. 따라서 bi-spiral 패턴의 절연성능을 확인하기 위해 정전계해석 및 절연파괴실험을 수행하였으며, 이를 통해 절연파괴전압을 정략적으로 유추할 수 있었다. bi-spiral의 절연성능을 검증하기 위해서 2인치 YBCO 박막에 해당 그림처럼 식각하였는데, 그림 5은 해당 식각 마스크를 모델링하여 정전계 수치해석을 수행하여 얻은 전계강도 분포그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 최대전계점은 마지막 stripe의 안쪽 곡면에 존재하는 것을 알 수 있으며, 또한 향후 절연파괴실험시에 절연파괴가 이 영역에서 진행될 것을 예상할 수 있었다.

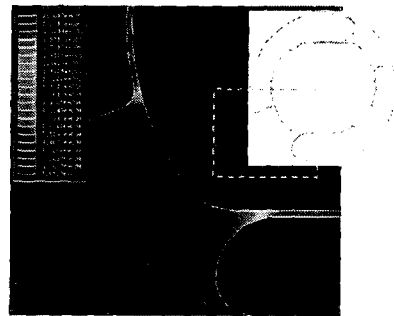


그림 5 모델링과 전계분포 그림

본 절연파괴실험은 시험전압을 절연파괴가 발생할 때까지 서서히 올리면서 진행하였는데, 평균 1.5kVrms 부근에서 절연파괴가 일어났다. 이 값은 기체질소 내에 해당 패턴을 두고 절연파괴전압을 측정된 값으로, 실제로는 박막은 액체질소 내에 놓이게 되므로 액체질소 내의 절연파괴전압은 대략 4배 이상 높을 것으로 생각된다. 하지만, 대부분의 절연 문제는 초전도체가 켤치되어 주위에 기포가 존재할 경우 심각해지므로 가장 가혹한 조건인 상온으로 테워진 기체질소 내의 절연파괴전압을 해당 박막의 절연파괴전압으로 보았다. bi-spiral 패턴으로 식각된 단위 YBCO 박막소자의 정격전압이 600V 이므로 이 절연파괴전압은 절연상 문제가 없을 것으로 사료되나 안전을 생각하여 전류리드와 가까운 영역의 stripe 사이의 간격을 2배로 증가시켜 절연문제를 해결하는 최

적의 단위소자 식각용 마스크인 bi-spiral 패턴을 설계하였다.

2.4 6.6kV 200A 초전도한류기 단상모듈 설계

현재 초전도한류기용 초전도소자는 정격전압 및 정격전류를 증대시키기위해 직렬 및 병렬로 연결되어 사용되는데, 본 연구에서는 6.6kV 200A 초전도한류기를 제작하기 위해 먼저 단상모듈을 구성하였는데, 단상모듈은 전압용량을 높이기 위해 박막을 8직렬로 구성하였으며, 전류용량을 증대시키기 위해서 다시 6병렬로 구성하였다. 그러므로 단상모듈은 총 48개의 YBCO 박막으로 구성되었으며, 직렬연결시의 소자들 사이의 동시켄치를 유도하기 위해 각 소자에 병렬로 저항을 취부하였다. 또한 6.6kV 200A 초전도한류기용 저온용기를 제작하여 제작된 단상모듈의 액체질소로 냉각시키고 한류특성을 살펴 보았다. 그림 6은 본 연구에서 제작된 단상모듈의 한류파형을 나타내는데, 매우 큰 사고예상전류를 단상모듈이 1/4 주기 이내에 재빨리 작은 전류로 제한하는 것을 알 수 있다.

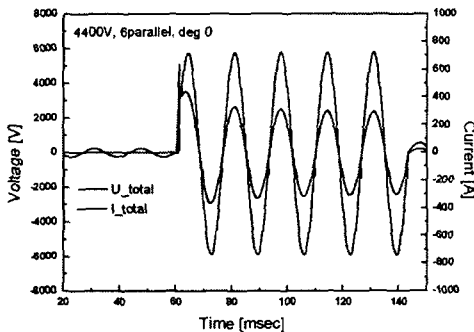


그림 6 단상모듈 한류특성 파형

2.5 6.6kV 200A 초전도 한류기 제작

실험적 방법 및 수치해석 방법으로 결정된 최적패턴으로 식각된 단위 박막소자로 구성된 단상모듈을 총 3개를 제작하여 각 상별로 연결하여 3상 6.6kV 3상 일괄형 초전도 한류기를 제작하였다. 각 상별의 절연거리를 고려하여 부싱 및 상판을 설계하였으며, 각 한류모듈을 배치하였다. 또한 고장전류가 흐를 때 발생하는 기계적인 힘에 파손이 되지 않고 또한 상판으로부터의 복사열을 막기 위해 baffle을 설치하였다. 그림 7은 제작된 초전도 한류기를 단락발전기를 이용하여 한류특성 시험장면을 보여준다. 시험결과 3상 모두 탁월하게 시험전류를 한류하는 것을 알 수 있었으며, 초기 시험전류의 기술기에 따라 켄치의 시작 시점이 변화하는 것도 관찰할 수 있었다.

3. 결 론

본 연구를 통해 6.6kV 200A 단상 초전도한류기 모듈을 설계하고 제작하여 양호한 한류특성을 얻었다. 단상모듈은 48개의 YBCO 박막을 직렬 및 병렬 연결하여 제작되었는데 본 연구에서는 단위 소자의 용량증대를 위해 최적의 식각 마스크 패턴을 결정하였는데, 수치해석 및 고속카메라를 이용한 켄치전파 특성을 살펴본 바 버블코너를 가지는 새로운 bi-spiral 패턴을 설계하였다. 설계된 bi-spiral 패턴의 절연성능을 수치해석 및 절연파괴실험으로 검증하고 해당 패턴의 형상을 변경하여 절연성능이 향상된 최종 패턴을 결정하였다. 결정된 패턴을 이용하여 YBCO 박막을 식각하고 단상모듈을 구성하여 단상모듈의 한류특성을 살펴보았으며, 설계된 단상 모듈을

이용하여 6.6kV 200A 3상 일괄형 초전도한류기를 제작하였고, 큰 예상전류를 빠르게 한류하는 것을 관찰하였다.

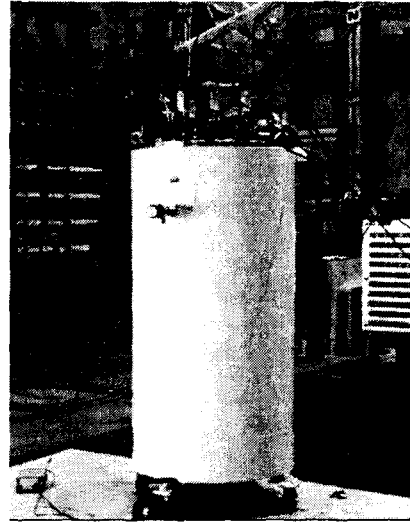


그림 7 6.6kV 200A 3상 일괄형 초전도한류기

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도용
용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다."

[참 고 문 헌]

- [1] Mathias Noe, Klaus-Peter Juengst, Frank Wefel, Lisa Co wey, Andre Wolf and Steffen Elschner "Investigation of high- T_c bulk material for its use in resistive superconducting fault current limiters," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 11, no. 1, March 2001.
- [2] J.H. Kubota, Y. K. Arai, M. Yamazaki, and H. Yoshino, "A New Model of Fault Current Limiter using YBCO thin Film," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 9, no. 2, pp.1365-1368, June 1999.
- [3] J.S Kang et al., "Quench propagation characteristics in YBCO films for resistive superconducting fault current limiter s", ISH2003 conference, August 2003.
- [4] B.W. Lee et al., "Analytical and Experimental Investigations on the Current Paths on the YBCO Thin Film for Resistive Fault Current Limiters," ICEE 2002 conference, vol. 7, no. 2, pp.828-831, June 1997.
- [5] B. Gromoll et al., "Resistive Current Limiters with YBCO films," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 7, no. 2, pp.828-831, June 1997